

煤层气爆炸极限分析

黄海仙¹ 李明¹ 顾安忠² 石玉美²

1. 同济大学化学系 2. 上海交通大学制冷与低温工程研究所

黄海仙等. 煤层气爆炸极限分析. 天然气工业, 2010, 30(12): 104-106.

摘要 煤层气爆炸极限的准确确定是煤层气安全开发利用的前提条件。煤层气爆炸极限不仅取决于单组分可燃性气体组成及其含量等自身因素, 还受到大气压力、温度等因素的影响, 因而首先对煤层气中单组分可燃性气体爆炸极限的准确确定十分必要。为此, 采用按完全燃烧所需要的氧原子数和按化学计量浓度两种理论方法对煤层气中常见的单组分可燃性气体进行计算及分析。结果表明, 两种理论方法对爆炸下限的计算比爆炸上限更好地接近实验值, 其中按完全燃烧所需要氧原子数的改进方法更为准确。然后对含有多组分的煤层气, 采用理查特利(Le Chatelier)公式法进行了理论计算, 分析了惰性气体、压力、温度对爆炸极限的影响, 与温度相比, 压力对爆炸上限的影响更大。因此, 在煤层气的开发利用中, 应尽可能在低温和低压条件下操作。

关键词 煤层气 甲烷 可燃性气体 爆炸极限 计算方法 影响因素 抑爆

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.12.025

煤层气的成分与热值与常规天然气类似, 可望成为中国 21 世纪天然气以外最重要的一种洁净能源, 将是常规天然气的重要补充^[1]。但是由于井下抽采的煤层气是甲烷和空气的混合物, 易燃易爆性又使得它成为威胁安全生产的头号元凶, 迫切需要对煤层气爆炸特性进行研究。爆炸试验有一定的危险性, 实验研究难度很大, 利用理论计算则能较好地满足需求。因此, 对井下抽采煤层气爆炸极限展开理论分析和研究, 不仅是预防该类事故的基本前提, 而且在理论研究和实践应用方面也具有现实意义。

目前对爆炸极限的确定基本上可以归纳为以下 4 类^[2-4]: 按完全燃烧所需氧原子数计算、按化学计量浓度计算、按理查特利(Le Chatelier)公式法确定爆炸极限以及纯经验公式。煤层气爆炸极限与多种因素有关, 不仅取决于甲烷浓度、气量等自身条件, 还受到大气压力、温度等方面的影响。掌握外界条件对爆炸极限的影响规律和计算方法, 根据实际气体浓度得到的爆炸极限对工业生产会有明确的指导意义。

1 煤层气爆炸极限的理论分析

煤层气的组成主要是甲烷和空气的混合物或是以

甲烷为主的多种有机燃气和空气的混合物。准确把握单组分爆炸极限的理论计算方法方法是确定混合组分爆炸极限的前提。

1.1 单组分可燃性气体爆炸极限的计算

1.1.1 按完全燃烧所需要的氧原子数

$$L_{\text{下限或上限}} = \frac{100a}{4.76(n_0 - b) + c} \times 100\% \quad (1)$$

式中 $L_{\text{下限或上限}}$ 为单组分气体的爆炸下限或上限; n_0 为每摩尔有机可燃性气体完全燃烧时所必需氧原子的物质的量; 当计算爆炸下限时, $a = b = c = 1$; 当计算爆炸上限时, $a = c = 4, b = 0$ 。

刘彬^[5]利用氧气系数 α 代替 n_0 , 提出了对上述爆炸极限公式的改进方法:

$$L_{\text{下限或上限}} = \frac{1}{4.76\alpha A + 1} \times 100\% \quad (2)$$

式中 A 为 1 mol 的有机可燃性气体完全燃烧时需要的氧气摩尔量; α 为氧气系数, 利用实验数据回归得到。当在化学计量浓度时, 空气供给为理论值, $\alpha = 1$; 当计算爆炸下限时, 空气供给过量, $\alpha = 2$; 当计算爆炸上限时, 空气供给不足, $\alpha = 1/3$ 。

基金项目 国家自然科学基金(编号: 20506019)的部分成果。

作者简介 黄海仙, 女, 1985 年生, 硕士研究生; 主要从事气体吸附分离研究。地址: (200092) 上海杨浦区四平路 1239 号。电话: 13564267918。E-mail: limingt@ mail.tongji.edu.cn

1.1.2 按化学计量浓度

化学计量浓度是可燃性气体完全燃烧,按化学反应方程式算出的可燃性气体—空气混合物中可燃性气体的浓度,立足于这一对应关系,通过实验数据回归得到相关系数(η)。即

$$L_{\text{下限或上限}} \approx \eta C_{\text{st}} \tag{3}$$

式中当计算爆炸下限时, $\eta=0.55$;当计算爆炸上限时, $\eta=4.8$; C_{st} 为燃气化学计量比浓度(体积)。

理论上,与 1 mol 空气完全燃烧的可燃性气体 $C_n H_m O_\lambda F_f$ 的体积浓度(C_{st})是:

$$C_{\text{st}} = \frac{100}{1 + A \left(n + \frac{m - f - 2\lambda}{4} \right)} \times 100\% \tag{4}$$

式中在空气中燃烧时, $A=4.773$ (是空气中氧摩尔分数 0.21 的倒数);在氧气中燃烧时, $A=1$ 。

利用上述方法对煤层气中常见有机可燃性气体(或蒸气)的爆炸极限进行了计算(见表 1)。

表 1 煤层气中常见有机可燃性气体(或蒸气)爆炸极限的理论计算值表

名称	实验值		公式(1)		公式(2)		公式(3)	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限	下限	上限
CH ₄	5.0	15.0	6.5	17.4	5.0	31.5	5.2	25.0
C ₂ H ₆	3.0	12.5	3.4	10.7	2.9	18.0	3.1	14.9
C ₃ H ₈	2.1	9.5	2.3	7.8	2.1	12.6	2.2	10.6
C ₄ H ₁₀	1.6	8.5	1.7	6.1	1.6	9.7	1.7	8.2
C ₂ H ₄	3.1	32.0	4.0	12.3	3.4	21.0	3.6	17.2
C ₃ H ₆	2.0	11.1	2.6	8.5	2.3	14.0	2.4	11.7
C ₄ H ₈	1.6	10.0	1.9	6.5	1.7	10.5	1.9	8.9
C ₅ H ₁₀	1.4	8.7	1.5	5.3	1.4	8.4	1.5	7.2

注:表中极限值均为体积分数,%。

由表 1 结果可以看出:

1)3 种公式对于爆炸下限的计算比爆炸上限更接近实验值。因为在爆炸下限时氧气过量,可燃性气体能够充分燃烧,用完全反应方程式进行计算是合适的。而在爆炸上限时,可燃性气体过量,氧气不足,反应不完全,用完全反应方程式进行计算误差较大。

2)在对烷烃、烯烃的爆炸下限计算中,公式(2)的计算值更接近于实验值。但是由于公式(2)的氧气系数是由有限的可燃性气体爆炸极限实验数据回归得到,对这些可燃性气体而言,比其他方法更为准确,而对于其他可燃性气体是否适用尚未确定。因此有一定的局限性。

1.2 复杂组成可燃混合气体爆炸极限的计算

煤层气属于由多种有机可燃性气体并含有惰性气体(N₂、CO₂、水蒸气)组成的混合气体。其爆炸极限会受到惰性气体的抑制作用,使得上限和下限范围变窄,当上限和下限重合时,即为爆炸临界点。

对于这种混合气体,其爆炸极限理论计算方法如下:

①将混合气中氮气和氧气以空气中的比例(N₂:O₂=4:1)扣除;②将剩下的混合气中的可燃性气体分别和其中的惰性气体配对,将其视为“新”的可燃性气体(体积为两种气体的体积和);③利用可燃性气体与惰性气体的混合爆炸极限图,分别得到调整后的“新”可燃性气爆炸极限;④利用理查特利(Le chatlier)公式计算得到混合气体的爆炸极限。

$$L_{\text{混}} = \frac{100}{\frac{V_1}{L_1} + \frac{V_2}{L_2} + \dots + \frac{V_n}{L_n}} \times 100\% \tag{5}$$

式中 $L_{\text{混}}$ 为混合气体的爆炸极限; $L_1, L_2, \dots, L_n$ 为各纯组分的爆炸极限; $V_1, V_2, \dots, V_n$ 为各纯组分的体积分数。

以贵州某煤层气为例,利用以上方法计算了多组分煤层气的爆炸上限和下限(见表 2)。由表 2 可以看出,混合气的爆炸极限与纯气体的爆炸极限有一定区别。

表 2 贵州某煤层气爆炸极限计算结果表

组 分	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₂ H ₆	CO ₂	O ₂	N ₂
体积分数	51.8	0.1	1.47	1.5	8.8	36.33
纯气体爆炸下限	5.0	2.1	2.0	—	—	—
纯气体爆炸上限	15.0	9.5	11.1	—	—	—
混合气爆炸下限	6.94					
混合气爆炸上限	15.14					

注:表中极限值均为体积分数,%。

以上理论计算是在常温常压下,但是实际操作都是在特定的温度和压力下进行。因此需要对理论计算值根据实际情况进行修正。

2 爆炸极限的影响因素

2.1 惰性气体对爆炸极限的影响

惰性组成在混合气中发挥了一种稀释作用,故在计算中采取“消元法”来体现这种作用。不同的惰性气体对煤层气爆炸极限的影响有较大差别,CO₂ 比 N₂ 对 CH₄ 爆炸极限有更大的影响,CO₂ 的惰化效果比

N₂ 好^[6]。

2.2 压力对爆炸极限的影响

压力对甲烷爆炸上限的影响显著,对爆炸下限影响较小。

对压力进行修正^[7]:

$$L_{U,p} = L_U + 20.6(\lg p + 1) \tag{6}$$

式中 $L_{U,p}$ 是压力 p 时的爆炸上限; L_U 是常压($p=0.1$ MPa)时的爆炸上限; p 是燃气绝对压力。

对贵州某煤层气运用式(6)在不同压力下的爆炸极限进行理论计算,结果如图 1 所示。

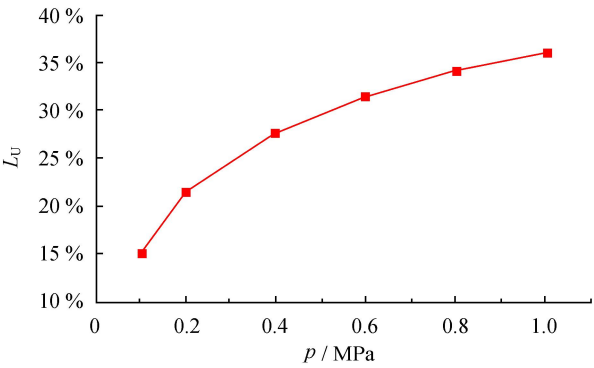


图 1 压力对甲烷爆炸上限的影响图

从图 1 中可以看出,随着压力的增大,煤层气的爆炸上限有着明显的上升,爆炸极限范围扩大。这是因为随着压力升高,分子间距减小,分子碰撞概率增大,导致燃烧反应更易发生。

2.3 温度对爆炸极限的影响

对温度进行修正^[7]:

$$L_U = L_U [1 + 8 \times 10^{-4} (t - 25)] \tag{7}$$

$$L_L = L_L [1 + 8 \times 10^{-4} (t - 25)] \tag{8}$$

式中 $L_{U,t}$ 是温度 t 时的爆炸上限; $L_{L,t}$ 是温度 t 时的爆炸下限; L_U 是 $t=25$ °C 时的爆炸上限; L_L 是温度为 $t=25$ °C 时的爆炸下限; t 为燃气温度。

对贵州某煤层气采用式(7)和式(8)计算不同温度下的爆炸极限,结果如图 2 所示。可以看出,随着温度的升高,煤层气的爆炸下限有所下降,而爆炸上限则有所上升,使得爆炸极限范围增大。这是因为系统温度升高,其分子内能增加,使更多的气体分子处于激发态,原来不燃的混合气体成为可燃、可爆气体,所以温度升高使爆炸危险性增大,对生产安全会造成极大的威胁。

2.4 综合温度、压力对煤层气爆炸极限的影响

对于爆炸上限,对温度、压力的综合作用进行修正^[7]:

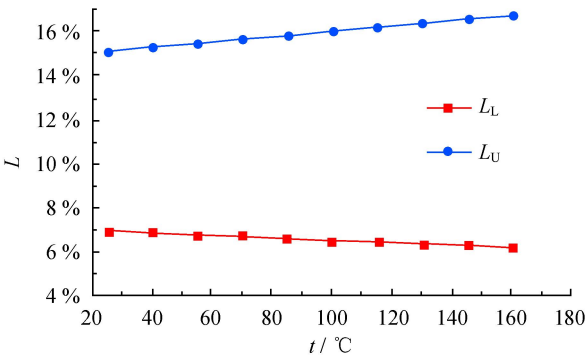


图 2 温度对爆炸上限和下限的影响图

$$L_{L,pt} = [L_U + 20.6(\lg p + 1)][1 + 8 \times 10^{-4} (t - 25)] \tag{9}$$

式中 $L_{L,pt}$ 是压力 p 、温度 t 时的爆炸上限; L_U 是常压($p=0.1$ MPa)、 $t=25$ °C 时的爆炸上限。

图 3 给出了温度和压力对爆炸上限的综合影响。可以看出随着温度、压力的提高,爆炸极限范围增大。在同一温度下,压力由 0.1 MPa 升高到 1.0 MPa,其爆炸极限由 15.14% 扩大到 35.74%。在同一压力下,温度由 25 °C 升高到 160 °C,低压时,爆炸上限几乎没有变化;在高压时,爆炸上限由 34.79% 上升至 35.74%。可见压力对爆炸上限的影响甚于温度对其的影响。因此,在煤层气的工业生产中,应尽可能在低压下操作。

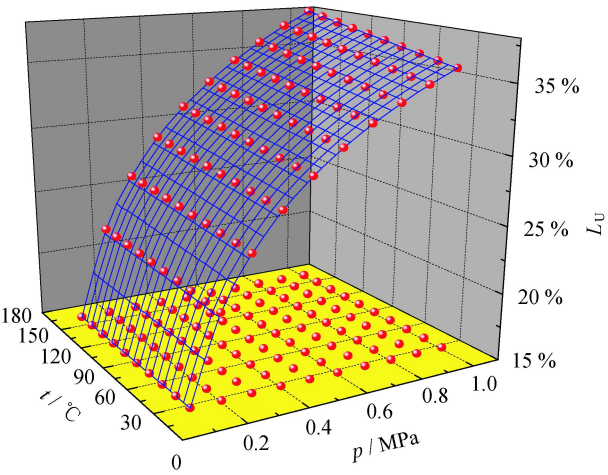


图 3 温度、压力对爆炸上限的综合影响图

3 结束语

3.1 理论分析结果

对煤层气中常见的单组分可燃性气体,按完全燃烧所需要的氧原子数和按化学计量浓度两种理论方法

对爆炸下限的计算比爆炸上限更好地接近实验值,其中按完全燃烧所需要氧原子数的改进方法更为准确。对含有多组分的煤层气,需采用理查特利(Le chatlier)公式法进行理论计算。在实际操作中,为保证绝对安全,需要对温度、压力进行修正。

3.2 减小爆炸极限范围的措施

在工业生产中,应尽可能使煤层气在低温和低压条件下操作。将煤层气中可燃组分浓度控制在爆炸上限之上并留有一定的余量,可以提高生产的安全性。当惰性气体体积分数加大时,氧体积分数相对减少,导致爆炸上限大幅度下降。故可采用充氮气的方法进行抑爆。

参 考 文 献

[1] 翟光明,何文渊.煤层气是天然气的现实接替资源[J].天然

气工业,2004,24(5):1-4.

[2] BOWES P C. Self-heating: evaluating and controlling the hazards[M]. London: Elsevier Science Ltd, 1984.

[3] 吴剑峰,孙兆虎,公茂琼.从含氧煤层气中安全分离提纯甲烷的工艺方法[J].天然气工业,2009,29(2):113-116.

[4] 许满贵,徐精彩.工业可燃性气体爆炸极限及其计算[J].西安科技大学学报,2005,25(2):139-142.

[5] 刘彬.有机可燃性气体爆炸极限的推荐计算方法[J].昆明理工大学学报:理工版,2007,32(1):119-124.

[6] 王华,葛岭梅,邓军.惰性气体抑制矿井瓦斯爆炸的实验研究[J].矿业安全与环保,2008,35(1):4-7.

[7] 严铭卿,廉乐明.天然气输配工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2005:52.

(修改回稿日期 2010-10-30 编辑 赵 勤)